



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

## FACULTAD DE INGENIERÍA COLEGIO DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA

**IDENTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL PRESENTE  
EN LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA  
RH18AB – RÍO ATOYAC – BALCÓN DEL DIABLO MEDIANTE EL  
USO DE LOS SIG**

### **TESIS**

Para obtener el grado de Ingeniero Topógrafo y Geodesta

### **Presenta:**

Citlali Concepción Méndez Díaz

### **Director (a):**

Mtra. Patricia Máximo Romero

### **Co Director:**

Dr. Rogelio Ramos Aguilar

**PUEBLA, PUE.**

**FECHA: OCTUBRE 2023**



**BUAP**

Oficio No. SAC/1757/2023

**C. Citlali Concepción Méndez Díaz, -201758148-  
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería  
Topográfica y Geodésica  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“IDENTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL PRESENTE EN LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA RH18AB – RÍO ATOYAC - Balcón del Diablo mediante el uso de los SIG”.**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesora de tema a la Mtra. Patricia Máximo Romero y al Dr. Rogelio Ramos Aguilar como Co Asesor.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**

**“Pensar bien, para vivir mejor”**

**H. Puebla de Z. a 21 de septiembre de 2023**

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director**



M'ACGZ /barv  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

Facultad  
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**P r e s e n t e.**

La que suscribe: Mtra. Patricia Máximo Romero, asesora del tema de tesis:

**“IDENTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL PRESENTE EN LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA RH18AB – RÍO ATOYAC - BALCÓN DEL DIABLO MEDIANTE EL USO DE LOS SIG”.**

Presentada por la C. Citlali Concepción Méndez Díaz -201758148-, pasante del Colegio de Topografía y Geodesia, y en atención al oficio No. SAC/1757/2023 con fecha de emisión 21 de septiembre de 2023, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

**A t e n t a m e n t e**

**“Pensar bien, para vivir mejor”**

**H. Puebla de Z. a 12 de septiembre de 2023**



**Mtra. Patricia Máximo Romero**  
**Asesora de Tema**

## Índice

Introducción .....	7
1. Generalidades del trabajo .....	8
1.2 Planteamiento del problema .....	8
1.2.1 Antecedentes del problema .....	8
1.2.2 Pregunta de investigación .....	10
1.3 Justificación .....	10
1.4 Objetivos .....	11
1.4.1 Objetivo General .....	11
1.4.2 Objetivos Específicos .....	12
2. Marcos de Referencia .....	12
2.1 Marco Conceptual .....	12
2.2 Marco Teórico .....	19
2.3 Marco Geográfico .....	26
3. Metodología .....	29
3.1 Recopilación de información .....	29
3.2 Análisis de información .....	29
3.3 Modelación en QGIS .....	30
3.4 Estimación de los indicadores .....	32
3.5 Propuesta de estrategia de planificación .....	33
4. Análisis de resultados .....	33
4.1 Modelación de pendientes .....	33
4.2 Mapa de uso de suelo y vegetación .....	35
4.3 Mapa de edafología .....	36

4.4 Mapa de degradación y erosión de suelo .....	37
4.5 Mapa de precipitación .....	38
4.6 Matriz de Saaty y normalización .....	40
4.7 Factor desencadenante y condicionante .....	44
4.8 Nivel de susceptibilidad y peligro .....	45
4.9 Rango de peligro .....	47
4.10 Análisis de vulnerabilidad .....	48
4.11 Estrategia de planificación .....	49
5. Conclusiones .....	50
6. Referencias Bibliográficas .....	51

## **RESUMEN**

El proyecto de investigación tuvo como objetivo determinar la vulnerabilidad ambiental presente dentro de la subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo mediante el uso de sistemas de información geográfica. Este es un estudio de tipo descriptivo en el cual se usó el método de Saaty este es ideal para comparar todos los elementos que influyen en el caso y elegir el nivel de preferencia desde un rango bajo al más alto.

La variable de estudio fue la precipitación dentro de la subcuenca y las actividades humanas que repercuten dentro de esta lo cual se ve reflejado en la degradación y erosión del suelo, además de estar condicionado por el tipo de suelo y la vegetación. La población estuvo constituida por 52 municipios en un área de 4106.2 km<sup>2</sup>, con una longitud de la corriente principal de 124902 m y con una elevación de 1142 msnm a 3967 msnm. El SIG utilizado fue QGIS, en el cual se procesaron los datos descargados de INEGI y CONABIO.

Los datos obtenidos fueron clasificados de acuerdo con el programa respecto con los factores que influyen en la vulnerabilidad ambiental. También se agregaron estrategias para la prevención de la vulnerabilidad ambiental.

## INTRODUCCIÓN

“México cuenta con características geográficas y sociales que lo convierten en uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático. Su ubicación entre dos océanos, su latitud y su relieve la hacen especialmente vulnerable a diversos fenómenos hidrometeorológicos” (INECC, 2016).

Este estudio aborda el tema de la vulnerabilidad ambiental en la subcuenca Rio Atoyac – Balcón del Diablo, ubicado en el estado de Puebla. Para empezar la vulnerabilidad es la insuficiencia de fortaleza cuando se presenta un acontecimiento riesgoso, o también puede verse como la insuficiencia de restablecerse después de un evento desastroso. Ahora bien, la vulnerabilidad ambiental es un concepto que se relaciona con la sensibilidad del medio ambiente y lo que conlleva éste como son los recursos naturales quienes son los más afectados a padecer deterioros o perjuicios de sus componentes naturales o fisiológicos.

La noción de vulnerabilidad ambiental adaptada a las cuencas hidrográficas es presentada en sucesos hidrometeorológicos exagerados, como son las granizadas, lluvias torrenciales, huracanes, inundaciones, sequías y tornados; y a la vez en circunstancias morfométricas graves, como puede ser la pendiente, geomorfología escarpada, suelos planos, uso de suelo y suelo expuesto.

De acuerdo con esto es necesario conocer las condiciones de riesgo de la cuenca hidrográfica y la relación que tiene con el clima, el uso de suelo y pendiente. Para esto el siguiente estudio va a evaluar a partir de indicadores la vulnerabilidad ambiental mediante el procesamiento de imágenes satelitales y modelación de datos en QGIS.

Para un buen aprovechamiento y administración del agua y su preservación de los ríos, es conveniente y preciso percibir la vulnerabilidad climática de la región, es decir, el cambio natural del clima, así como el avance de la temperatura y la precipitación como elementos causantes del orden de escurrimiento y escorrentía en la cuenca.

Además, para analizar esta problemática es necesario conocer la zona de estudio geográfica y socialmente; y estimar un tiempo de retorno para comparar su evolución respecto a los indicadores.

Como resultado de este estudio se espera una herramienta visual para determinar las zonas más vulnerables ambientalmente y así mismo proponer soluciones a futuro.

## **1. Generalidades del trabajo**

### **1.1. Planteamiento del problema**

#### **1.1.1. Antecedentes**

Cotler Avalos (2010) señala que “México es un país con alta variabilidad climática, consecuencia de su ubicación geográfica y topografía compleja. Esta complejidad determina el desarrollo de las precipitaciones y temperaturas a escala regional, que a su vez determinan la dinámica de las cuencas hidrográficas de nuestro país. Los impactos potenciales del cambio climático en las cuencas de los ríos dependen de muchos factores, tales como: B. el relieve de la región, su ubicación (zona costera o valle, etc.), la sensibilidad del clima o la respuesta de las temperaturas locales y regionales y las condiciones de precipitación de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente de origen antrópico, como la urbanización , deforestación, contaminación del agua y sobreexplotación de las aguas subterráneas, entre otros” (p. 28).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 480 comunidades de las 13 entidades de la República Mexicana son las más vulnerables al cambio climático, que es el 20% de comunidades a nivel nacional. México es un país sumamente perjudicado por la desertificación que conlleva a la degradación de la tierra debido al calentamiento global, el cambio de uso del suelo y el incumplimiento de la ordenación del territorio, por lo

tanto, todos estos factores en conjunto repercuten aún más en la vulnerabilidad ambiental en las cuencas hidrográficas.

Sin embargo, en el Atlas Mundial de la Desertificación presenta que el número de tierras secas aumentó entre 1951 y 2010, y muchas de ellas ahora sufren problemas de degradación de la tierra; y para 2025, alrededor de 1800 millones de personas vivirán en zonas con grave escasez de agua. En nuestra región, cada año se pierden 1,5 millones de hectáreas de tierra debido a la degradación provocada por la falta de una política de conservación.

Es importante investigar lo que el gobierno está haciendo al respecto debido a que el ordenamiento territorial es un factor debido a que a veces el suelo simplemente se pierde o se erosiona; otros son destruidos por el procesamiento agrícola o la ganadería, y muchos otros tienen procesos en los que se deterioran por la exposición al viento, el agua y el uso de productos químicos.

Más de la mitad de los suelos de México están sufriendo degradación, principalmente por actividades agrícolas y ganaderas, algunos de los factores que explican este estado son: el cambio climático, la sobreexplotación de la tierra y el agua, la falta de prácticas agrícolas sostenibles, la expansión de los monocultivos, la expansión de la agricultura de frontera y el desarrollo de asentamientos urbanos.

Aunque solo el 14 % del país tiene capacidad agrícola, según los datos recolectados, actualmente el 16 % se utiliza para esta actividad. La sobreexplotación de este recurso incide en la erosión hídrica y eólica que se presenta en prácticamente todos los suelos mexicanos. El 70 % de la degradación es moderada o extrema, reduciendo la fertilidad del suelo.

Dependiendo de las condiciones ambientales, se pueden formar suelos de 1 cm de espesor cada 4 siglos. Sin embargo, un manejo inadecuado puede llevar a su pérdida en pocos años. Por lo tanto, los suelos se consideran un recurso no renovable en la escala de tiempo humana. La degradación de la tierra es un proceso causado por el hombre que reduce la capacidad presente y futura de ese recurso para sustentar la vida humana.

### **1.1.2 Pregunta de investigación**

¿Cuál es la vulnerabilidad ambiental en la subcuenca hidrográfica Rio Atoyac – Balcón del Diablo para las condiciones climáticas actuales?

### **1.2 Justificación**

Los 17 ODS tienen por objetivo frenar el cambio climático, el año 2025 tiene varios objetivos importantes de los cuales resaltaremos los que hagan énfasis en la degradación del suelo para determinar los factores que lo provocan y así contrarrestar los daños, además de la comparación de 10 años atrás con la actualidad. El deterioro de la tierra es una cuestión de compleja resolución, su propio uso y el clima son factores importantes para determinar la gravedad de una subcuenca, esto genera problemas socioeconómicos debido al uso de suelo en particular por la agricultura. Por otra parte, calcular en qué medida afecta el cambio climático a la degradación del suelo y detectar las zonas más vulnerables ayudara a tener visibilidad a futuro para propuestas respecto al daño.

Los factores que influyen en la vulnerabilidad al medio ambiente de una cuenca hidrográfica son de clase natural y de carácter antrópico a lo largo del tiempo, cambiando la superioridad de uno con otro conforme a la zona de análisis.

Considerando lo anterior surge el interés por determinar el grado de vulnerabilidad ambiental en la subcuenca hidrográfica Balcón del Diablo. El riesgo de desastres existe en la medida en que las condiciones peligrosas y vulnerables convergen como factores de riesgo. Por lo tanto, comprender cómo estos factores interactúan y dan forma a situaciones de riesgo específicas a medida que surgen es esencial para una buena gestión de riesgos. Representan oportunidades reales para impactar a las comunidades, los ecosistemas que sostienen y los medios de vida que sustentan. La amenaza se refiere a los procesos externos e internos de un sistema de origen natural como son los ecosistemas, antropogénico o socio natural que pueden interactuar con él y provocar cambios significativos, lentos o repentinos. En este sentido, se refiere a una condición física que puede causar efectos adversos o daños a una población, los ecosistemas que utiliza o sus medios de vida. Cabe recalcar aquí que la

mayoría de la distribución ambiental y territorial están ligadas a alteraciones que interactúan entre sí.

Uno de los problemas ambientales de mucho impacto en el mundo es la degradación de la tierra. El hecho de que se degrade el suelo lleva a que se reduzca la productividad de árboles y plantas, además de otro recurso importante que es el agua. El impacto negativo de los suelos degradados en la economía regional es más severo en áreas donde los ingresos dependen más de la agricultura, como es el caso de la subcuenca a estudiar la cual cuenta con varias centrales de abasto. La protección y rehabilitación del suelo son una parte esencial para el desarrollo agrícola sostenible el cual depende de una buena gestión de gobierno. La planificación espacial permite definir la perspectiva a través de escenarios que se toman como punto de referencia para seleccionar una imagen objetiva a lograr en el largo plazo, tratando de regular la vulnerabilidad ambiental.

Debido a lo expuesto previamente, en este estudio se considera vincular los datos geográficos con los socioeconómicos y climáticos para poder contar con información detallada de las causas de vulnerabilidad, además de hacer comparación en el tiempo y poder asimilar si es notable el cambio en la subcuenca. Por último, con la información obtenida se evaluará la vulnerabilidad para proponer acciones que ayuden a mitigarla solo en las zonas que presenten mayor riesgo.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar la vulnerabilidad ambiental de la subcuenca hidrográfica Balcón del Diablo mediante indicadores de referencia de vulnerabilidad ambiental con ayuda de los SIG.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Estimar los indicadores de referencia para la vulnerabilidad ambiental presentes en la subcuenca Balcón del Diablo ligados al medio natural y a la intervención por el hombre.
- Identificar por medio de un mapa la zona más vulnerable y registrar las causas por la cual se presenta así.
- Plantear posibles soluciones para contrarrestar el daño en las zonas más vulnerables.

## **2. Marcos de Referencia**

### **2.1 Marco Conceptual**

#### **Cuenca hidrográfica**

Una cuenca se puede definir como un término utilizado para referirse a un área, región o área cuya característica principal es que el agua de lluvia que cae en esa superficie fluye a través de un canal común. Esto significa que toda el agua acumulada fluye hacia un afluente más grande, una laguna o el mar (Sánchez, A. S., García, R. M., Palma A., 2003, p. 9).

#### **Parteaguas**

El parteaguas es una línea de demarcación natural del territorio del cual desciende el arroyo, formando una red hidrográfica. Es la zona más elevada de la montaña. Ésta separa una cuenca de otra contigua. La superficie de montañas y lomeríos que drenan a un cauce común y desaguan en una misma corriente principal conforman una cuenca hidrográfica (Sánchez, A. S., García, R. M., Palma A., 2003, p. 10).

## **Laderas**

Las laderas son los terrenos de las pendientes más altas, que a su vez provienen de una serie de arroyos. El desnivel del terreno crea un sistema de cuenca de drenaje que recoge todas las precipitaciones y escorrentías permanentes para desviarlas a un cauce principal o común para terminar su recorrido en un cauce mayor, que puede ser una laguna o el mar (Sánchez, A. S., García, R. M., Palma A., 2003, p. 10)

Hidrológicamente, México consta de 37 cuencas hidrográficas. Se han dividido en 13 regiones hidrológicas y administrativas; Las cuencas se dividen a su vez en subcuencas y microcuencas Una cuenca puede incluir varios estados, municipios o localidades, según su extensión

A continuación, se analizarán algunas causas por las que México ha perdido grandes extensiones de recursos forestales y cómo cambiar el equilibrio agua-suelo-vegetación ha degradado la calidad de vida de todas las personas al reducir la disponibilidad de agua.

- El agotamiento acelerado de nuestros recursos forestales se debe a la tala inmoderada, los incendios, las plagas y enfermedades, pero en realidad éstos sólo son efectos de una problemática social y económica de proporciones locales y globales.
- La construcción de caminos forestales y carreteras, trazados sin considerar el impacto ambiental y sin criterio hidrológico, provocan deslizamientos y la formación de quebradas o acequias y arroyos.
- Cuando los taludes de los cortes de carreteras no se protegen adecuadamente, los efectos de la lluvia son devastadores, debido a que los deslaves de tierra y rocas ponen en riesgo la vida de la gente.
- En laderas empinadas sin vegetación protectora, la acción física de la lluvia sobre el suelo conduce a la erosión.

## **SIG**

ESRI define como Sistema de información geográfica (GIS) es un marco para recopilar, administrar y analizar datos. Adaptado de las ciencias de la tierra, GIS integra muchos tipos de datos. Estudia la ubicación espacial y la información de capas en visualizaciones de mapas y escenas 3D. Con esta capacidad única, GIS proporciona información más profunda sobre datos como patrones, relaciones y situaciones, lo que ayuda a los usuarios a tomar mejores decisiones.

## **Mapas**

ESRI define los mapas como contenedores geográficos para las capas de datos y los análisis con los que desea trabajar. Fácilmente compartidos e integrados en aplicaciones, los mapas SIG pueden ser vistos por prácticamente cualquier persona, en cualquier lugar.

## **Datos**

ESRI explica que los SIG integra muchos tipos de capas de datos de posición espacial. La mayor parte de los datos tienen un elemento geográfico. Los datos SIG incluyen imágenes, características y mapas base asociados con hojas de cálculo y tablas.

## **Análisis**

ESRI define que el análisis espacial le permite evaluar la idoneidad y las capacidades, estimar y predecir, interpretar y comprender, y más para obtener nuevos conocimientos para la visión y la toma de decisiones.

## **Indicadores de referencia para la subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo**

Estos indicadores de referencia nos ayudaran a analizar cada uno de los datos para relacionar las causas y efectos, además de saber cuál es la influencia climática.

### **Precipitación anual**

Una parte importante del suelo es su “forma de relieve”. El termino relieve implica la forma del terreno y se define como la elevación o irregularidad de un área considerada en un conjunto (Baridón E., 2019). En la tabla 1 se muestra el código que será utilizado en el mapa respecto a la subcuenca hidrográfica, los factores que serán analizados y una pequeña descripción.

Factor	Descripción
De 400 – 500 mm	Precipitación Baja
De 500 – 600 mm	Precipitación Media Baja
De 600 – 800 mm	Precipitación Media
De 800 – 1000 mm	Precipitación Media Alta
De 1000 – 1200 mm	Precipitación Alta

Tabla 1. Factores para la valoración de la forma del terreno

Fuente: Elaboración propia

### **Edafología**

Datos geospaciales que muestran la distribución de los principales tipos de suelo junto con las propiedades físicas y químicas existentes y las limitaciones físicas y químicas, según la Base de datos mundial de recursos de suelo de referencia (INEGI) de la FAO, como se muestra en la Tabla 2, la cual contiene un código, factor y descripción que será utilizado en el producto visual elaborado en QGIS.

Factor	Descripción
Cambisol Calcico	Agrícola dependiente de la lluvia
Cambisol Eutrico	Agrícola dependiente de la lluvia
Castañosem Haplico	Agrícola dependiente de la lluvia
Chernozem Calcico	Para pastar ganado en verano
Feozem Cacarico	Agrícola bastante fértil
Feozem Haplico	Agrícola bastante fértil
Fluvisol Eutrico	Arcilloso de uso forestal
Litosol	Erosionados aptos para pastizales
Luvisol Ortico	Agrícola con método de riego
Regosol Calcarico	Agrícola con método de riego
Regosol Eutrico	Agrícola con método de riego
Rendzina	Desarrollado a partir de rocas
Vertisol Pelico	Contiene alto contenido de arcillas expansivas
Xerosol Calcico	Suelo seco

Tabla 2. Factores para la valoración de edafología

Fuente: Elaboración propia

## Vegetación y uso del suelo

En la Tabla 3 se muestra la vegetación y uso de suelo que será representada en un mapa, la cual contiene un código, factor y descripción, además esta información geoespacial de importancia nacional muestra la distribución del uso del suelo agrícola, la vegetación natural y artificial en el país también muestra el uso ganadero y forestal, así como otros usos del suelo que ocurren en asociación con la cubierta vegetal. El uso del suelo agrícola está representado por la disponibilidad de agua para diferentes tipos de cultivos a lo largo de su ciclo agrícola. La vegetación se muestra de acuerdo con las disposiciones para el uso y mejoramiento del Catálogo Mexicano de Tipos de Vegetación Natural e Inducida para Fines Estadísticos y Geográficos (INEGI).

Factor	Descripción
Agricultura de Riego	Tiene diferentes sistemas de riego
Agricultura de Temporal	Depende de la precipitación
Bosque Cultivado	Arboles establecidos por plantación
Bosque de Encino	Característico de zonas montañosas
Bosque de Encino – Pino	Característico de las zonas templadas
Bosque de Oyamel	Resistente a bajas temperaturas
Bosque de Pino	Se desarrollan en climas subhúmedos
Bosque de Tascate	Especies con hojas en forma de escamas
Chaparral	Se caracteriza por ser un bosque bajo o arbustal

Matorral	Predominan arbustos y arboles bajos
Palmar	Es una familia de plantas con flores
Pastizal Inducido	Surge cuando es eliminada la vegetación original
Pradera	Están ubicadas en zonas templadas
Selva Baja Caducifolia	Se caracterizan por los árboles de bajo porte y armados con espinas.

Tabla 3. Factores para la valoración de la vegetación y uso de suelo

Fuente: Elaboración propia

### Pendiente (%)

La pendiente del terreno se refiere a la pendiente de la superficie de ese terreno. Es una parte natural del suelo mismo. Se define por su gradiente, forma y longitud (Baridón E., 2019). En la tabla 4 se muestra el código que será utilizado en el mapa respecto a la subcuenca hidrográfica, los factores que serán analizados y una pequeña descripción.

Rango	Descripción
< 3°	Ligeramente plano
3° – 12°	Moderadamente inclinado
12° – 25°	Fuertemente inclinado
25° - 50°	Moderadamente empinado
> 50°	Empinado

Tabla 4. Factores para la valoración de la pendiente

Fuente: Elaboración propia

## Degradación del suelo y erosión

El drenaje se refiere a la rapidez y facilidad con que el agua se elimina del suelo, por escurrimiento, por pasaje a través del suelo mismo (infiltración y percolación) hacia capas subterráneas, la evaporación y la transpiración contribuyen a la eliminación del agua (Baridón E., 2019), como se muestra en la Tabla 5, se puede observar el código que será utilizado en el mapa, el factor que en este caso mide la compacidad del drenaje y una descripción.

Factor	Descripción
Degradación Física	Afecta el desplazamiento del aire, el agua y sus nutrientes
Degradación Química	Esta dada por actividades industriales y agrícolas
Erosión Hídrica	Se produce debido al paso del agua
Erosión Eólica	Provoca pérdida de fertilidad del suelo y desertificación.

Tabla 5. Factores de valoración para la degradación del suelo y erosión  
Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Marco Teórico

### Método AHP de Saaty

Expuesto por el matemático Thomas L. Saaty (1980), este método consiste en establecer la comprensión intuitiva de un problema complejo y multiobjetivo mediante la creación de un modelo jerárquico que permita al decisor estructurar visualmente el problema.

AHP se basa en la lógica de que la experiencia humana y el conocimiento de un problema determinado son tan valiosos como los datos utilizados (Saaty, 1980; Ellineema, 2002).

Combinar valores tangibles e intangibles para lograr prioridades de magnitud adecuada en relación con alternativas problemáticas. Sus principales características son el modelado del problema mediante una estructura jerárquica, el uso de comparaciones por pares para dar

cuenta de las preferencias del decisor y la obtención de una escala de cociente importante para la toma de decisiones complejas. Hurtado, T. & Bruno, G. (n.d.).

### **El Proceso Analítico Jerárquico De Saaty (AHP)**

El modelo incluye tres niveles: meta, criterios y alternativas. Una vez creado, se realizan comparaciones por pares entre estos factores y se asignan valores numéricos a las preferencias informadas por los individuos. La base del proceso de Saaty es cuantificar los juicios de las personas midiendo cómo cada elemento de la jerarquía contribuye al siguiente nivel superior del que emerge (Saaty, 1998). Para estas comparaciones se utilizan escalas de preferencia, importancia o razón de verosimilitud basadas en una escala numérica del 1 al 9 propuesta por Saaty. Hurtado, T. & Bruno, G. (n.d.).

### **Fundamentos del AHP**

- Estructurar el modelo jerárquico (representar el problema identificando objetivos, criterios, subcriterios y alternativas)
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico
- Comparaciones binarias entre los elementos
- Evaluación de los elementos mediante asignación de pesos
- Clasificación de variantes basada en pesos dados. Hurtado, T. & Bruno, G. (n.d.).

### **Ventajas del AHP**

- Muestra un sustento matemático
- Proporciona desglosar y examinar un problema por partes
- Te permite medir criterios cuantitativos y cualitativos con una escala común
- Posibilita la implicación de diferentes personas o grupos de interés y la consecución de consensos. Hurtado, T. & Bruno, G. (n.d.).

## **Método del AHP**

Las prioridades o importancia relativa de las alternativas o factores se determinan por comparación en un juicio de valor.

Luego se calcula el vector principal (vectores propios), que establece sus pesos; Esto se logra mediante el método determinista del álgebra lineal: los autovalores se descomponen mediante los vectores calculados, que proporcionan una medida de la consistencia del juicio u opinión (Saaty, 1980).

Con base en el índice de consistencia de la matriz, se calcula el índice de consistencia (consistency ratio) Garcés Ortega, Jhonny Humberto (2015).

## **Base matemática del AHP**

AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades prioritarias, pares probables de preferencias de ubicación basadas en un atributo o criterio común representado en una jerarquía de decisión. Creemos que este es un enfoque natural (pero sofisticado) que los humanos han utilizado para tomar decisiones mucho antes de que se desarrollaran las funciones de utilidad y AHP se desarrollara formalmente.

AHP permite tomar decisiones grupales al agregar opiniones de tal manera que, al comparar dos elementos, se satisface la relación mutua. Luego tome la media geométrica de la retroalimentación. Cuando el grupo está compuesto por expertos, cada uno de ellos desarrolla su propia jerarquía y el AHP combina los resultados por media geométrica. Garcés Ortega, Jhonny Humberto (2015).

## **Establecimiento de prioridades con el AHP**

AHP le pide al tomador de decisiones que indique una preferencia o prioridad para cada alternativa de decisión en función de la medida en que contribuye a cumplir con cada criterio. Dada la información de materialidad y preferencia, se utiliza un proceso matemático llamado síntesis para resumir la información y clasificar las alternativas en términos de preferencias generales, Garcés Ortega, Jhonny Humberto (2015).

## Comparación entre pares

La comparación entre pares es una base fundamental del AHP. El AHP utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 (como se muestra en la tabla 6) para calificar las preferencias relativas de los dos elementos. Se presentan las calificaciones numéricas recomendadas para las preferencias verbales expresadas por el tomador de decisiones. Investigaciones anteriores han determinado que esta es una escala razonable para distinguir las preferencias entre dos alternativas, Garcés Ortega, Jhonny Humberto (2015).

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuerte y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderada y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igual y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Tabla 6. Escala de preferencias con su respectivo valor numérico.

Fuente: Hurtado, T. & Bruno, G. (n.d.).

La tabla 6 también puede verse como la siguiente tabla 7, indicando desde los valores bajos hasta los altos.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema baja	Muy baja	Baja	Media baja	Igual	Media alta	Alta	Muy alta	Extrema alta

Tabla 7. Escala de comparación de pares del valor menor hasta el más alto.

Fuente: Garcés Ortega, Jhonny Humberto (2015).

## **Síntesis**

Habiendo creado una matriz de comparación entre los pares, puede calcular la llamada prioridad de cada artículo comprado. A esta parte del AHP se le conoce como sinterización. El desarrollo matemático preciso que se requiere para realizar tal sinterización implica el cálculo de valores y vectores específicos. El siguiente proceso de tres pasos proporciona una buena aproximación de las prioridades resumidas. Hurtado, T. & Bruno, G. (n.d.).

### **Procedimiento para sintetizar juicios**

Paso 1. Sumar los valores de cada columna de la matriz de comparación entre pares.

Paso 2. Divide cada elemento de la matriz por la suma de su columna; La matriz resultante se denomina matriz de comparación por pares normalizada.

Paso 3. Calcular el promedio de los elementos en cada renglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan. Hurtado, T. & Bruno, G. (n.d.).

### **Características físicas**

Como afirma Monsalve, 1995, las propiedades físicas de las cuencas hidrográficas dependen de la morfología, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la geología y las prácticas agrícolas, entre otros, y es esta información la que permite conocer las variaciones espaciales de los elementos del balance hídrico.

### **Área de la cuenca**

La cuenca está definida por la zona delimitada por la curva perimetral (P). Esta línea generalmente se traza a través de la interpretación de fotografías aéreas donde los relieves (y, por lo tanto, las cuencas hidrográficas) son visibles, o en un mapa topográfico basado en las curvas de nivel presentadas. Este es probablemente el factor más importante en la relación entre la caracterización morfológica y la escorrentía.

Debido a que los métodos de estimación de la escorrentía solo son válidos cuando se aplican a áreas con características similares, a veces es necesario subdividir grandes cuencas con una red de drenaje muy compleja en cuencas o subsistemas más pequeños, pero más homogéneos. (Ibáñez S., Moreno H., Gisbert J.M., p. 5).

### "Longitud del cauce principal (L), perímetro (P) y ancho (W)" ("Morfología de las cuencas hidrográficas")

La longitud L de una cuenca de drenaje se define por la longitud de su ramal principal, que es la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de confluencia aguas abajo y la distancia topográfica máxima aguas arriba. Al igual que la superficie, este parámetro tiene un gran impacto en la generación de escorrentía y, por lo tanto, es esencial para el cálculo de la mayoría de los índices morfométricos. En relación con el perímetro de la cuenca, P, proporciona información sintética sobre la forma de la cuenca; Con la misma área, las circunferencias con mayor valor corresponden a cuencas alargadas, las de menor valor a cuencas redondas (como se muestra en la Fig. 1) (Ibáñez S., Moreno H., Gisbert J.M., p. 6).

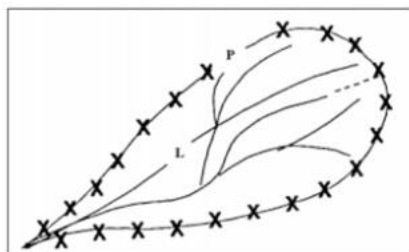


Fig. 1 - Longitud y perímetro de una cuenca

Fuente: (Ibáñez S., Moreno H., Gisbert J.M., p. 6).

En última instancia, el ancho se define como la relación entre el área superficial (A) y la longitud de la cuenca (L); está marcado con la letra W, como se muestra en la Ec. 3:

$$W = \frac{A}{L}$$

(Ec. 3)

Dónde:

A: superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>.

L: longitud de la cuenca en km.

### **Pendiente media**

La pendiente es la variación de la pendiente de la cuenca, su determinación es importante para determinar el comportamiento de la cuenca en relación con el movimiento de las capas del suelo (erosión o sedimentación), ya que los problemas de erosión son más comunes en zonas con fuertes pendientes; mientras que en las regiones planas se dan principalmente por drenaje y sedimentación. La pendiente media de la cuenca indica el promedio ponderado de todas las pendientes de las superficies elementales, ocupando la pendiente máxima como constante. Esta propiedad controla en gran medida la velocidad a la que se produce la escorrentía superficial y, por tanto, afecta el tiempo que tardan las aguas pluviales en concentrarse en los cauces de los ríos que componen la red de drenaje (Monsalve, 1995).

### **Desnivel altitudinal (DA)**

Es el valor de la diferencia entre la altura máxima y mínima de la piscina ( $DA=HM-Hm$ ). Esto está relacionado con la variabilidad climática y ecológica, ya que una cuenca con múltiples elevaciones puede albergar múltiples ecosistemas cuando existen diferencias significativas en precipitación y temperatura (Ibáñez S., Moreno H., Gisbert J.M., p. 7).

### **Parámetros de forma**

La forma de la cuenca es un determinante de su comportamiento hidrológico (cuencas de la misma superficie pero de diferente forma muestran diferentes respuestas hidrológicas -y por tanto diferentes hidrogramas- ante una capa de precipitación del mismo tamaño y evolución), por lo que algunos parámetros intentan cuantificar las características morfológicas con

indicadores o coeficientes Los principales parámetros de la forma son: coeficiente de compacidad y rectángulo equivalente y coeficiente de Horton (Ibáñez S., Moreno H., Gisbert J.M., p. 7).

### **Coeficiente de Gravelius**

Este coeficiente, también llamado coeficiente de compacidad, conecta el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca redonda teórica de la misma área; Por lo tanto, se estima la relación entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud de la cuenca (la longitud desde la boca hasta el punto topográficamente más distante), en la Ec. 4 se muestra cómo obtener el coeficiente de Gravelius (Ibáñez S., Moreno H., Gisbert J.M., p. 7).

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

(Ec. 4)

Donde:

Cg=coeficiente de Gravelius

P= perímetro de la cuenca, en km

A= superficie de la cuenca, en km<sup>2</sup>

### **2.3 Marco Geográfico**

La Región Hidrológica 18 nombrada Balsas está ubicada entre los paralelos 17° 13' y 20° 04' de latitud Norte y los meridianos 97° 25' y 103° 20' de longitud Oeste. Tiene un área hidrológica de 117,405 km<sup>2</sup>, el cual equivale al 6% del territorio mexicano. La región hidrológica, delimitada por las cadenas montañosas Sierra Madre del Sur y Sierra de Juárez y el eje neovolcánico, tiene la forma de una depresión muy alargada con valles muy angostos, cuyo territorio está formado principalmente por cerros escarpados, una configuración geológica que no es propicia para el control y almacenamiento de caudales significativos en

la región hidrológica, ya que tiene un potencial significativo de caudal sostenido superior a 900 mm por año. Incluye todo el estado de Morelos y porciones de los estados de Tlaxcala, Puebla, Ciudad de México, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco, y porciones muy pequeñas del Distrito Federal y el estado de Veracruz; con un total de 422 municipios y una superficie total de 117.305,9 km<sup>2</sup>, como se muestra en la Fig. 2

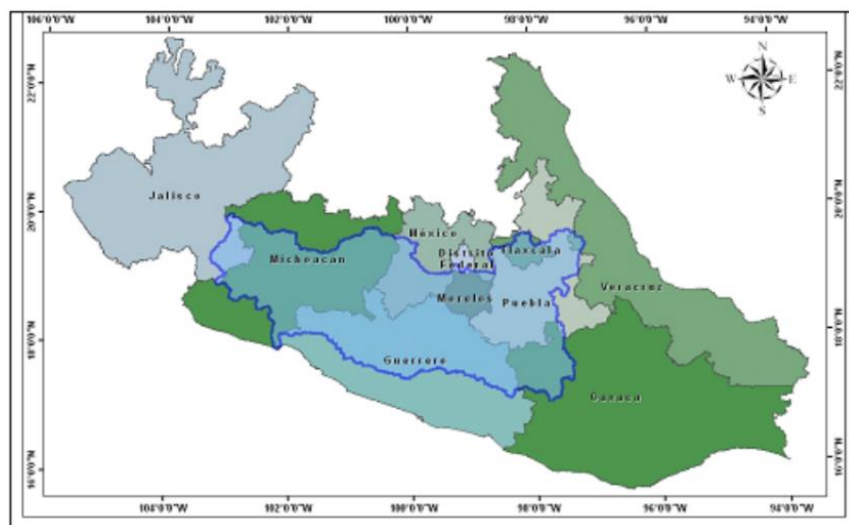


Fig. 2 - Localización de la región hidrológica numero 18 Balsas, con los estados que abarca.

Fuente: Diario Oficial de la Federación

El río Atoyac es un afluente que pertenece a la Región Hidrológica del Río Balsas. La Sierra de Atoyac comprende las cuencas de los ríos Atoyac-Tehuizingo, Atoyac-Balcón del Diablo, Presa Manuel Ávila Camacho, Atoyac-San Martín Texmelucan, Río Nexapa, Río Mixteco, Río Acatlán, Totolcingo y Alseseca. El río tiene una longitud de 84,97 km. (Mundo Nuestro, 2021).

La subcuenca R. Atoyac – Balcón del Diablo, es de tipo exorreica, tiene un área de 4106.2 km<sup>2</sup>, perímetro de 444.69 km, elevación máxima de 4400 m y mínima de 1140 m; y su longitud de corriente principal es de 124.902 km (SIATL), como se muestra en la Fig. 3



Fig. 3 - Localización de la subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo

Fuente: INEGI

Los municipios pertenecientes a la subcuenca RH18Ab son:

Acajete, Acatzingo, Ahuatlán, Amozoc, Atexcal, Atoyatempan, Cuapiaxtla de madero, Coatzingo, Cuautinchán, Chalchicomula de Sesma, Chigmecatitlán, General Felipe Ángeles, Huatlatlauca, Huiziltepec, Ixcaquixtla, Juan N. Méndez, La Magdalena Tlatlauquitepec, Mazapiltapec de Juárez, Mixtla, Molcaxac, Cañada Morelos, Nopalucan, Palmar de Bravo, Puebla, Quecholac, Los Reyes de Juárez, San Diego la Mesa Tochimiltzingo, San Juan Atenco, San Juan Atzompa, San Salvador El Seco, San Salvador Huixcolotla, Santa Catarina Tlaltempan, Huehuetlán el Grande, Santo Tomas Hueyotlipan, Soltepec, Tecali de Herrera, Tecamachalco, Tehuacán, Teopatlan, Tepanco, Tepatlaxco, Tepeaca, Tepexi de Rodríguez, Tepeyahualco de Cuauhtémoc, Tlacotepec de Benito Juárez, Tlanepantla, Tochtepec, Tzicatlacoyan, Xochiltepec, Xochitlán Todos Santos, Yehualtepec, Zacapala.

### **3. Metodología**

#### **3.1 Recopilación de información**

En este paso se procedió a recolectar toda la información necesaria para elaborar los primeros capítulos y tener las herramientas necesarias para concluir el estudio, en ellos se rescató información de la cuenca y subcuenca, además de artículos convenientes para justificar el tema principal. Esta información se trata de:

- Ubicación de la subcuenca en SIATL.
- Manejo de herramientas de medición y uso de la información cuantitativa del SIATL.
- Información de antecedentes, artículos, metodología y cuencas hidrográficas en México.
- Plan de ordenamiento territorial en municipios del estado de Puebla.
- Actualizaciones de cambio climático y artículos relacionados.
- Descarga de mapas de degradación de suelos, precipitación, edafología, uso de suelo y vegetación en INEGI y CONABIO.
- Métodos para procesar los datos y poder usarlo con software de QGIS.

#### **3.2 Análisis de información**

De acuerdo con la información obtenida se siguió a revisar las características y examinar lo más importante.

Artículos y libros: Todos los artículos revisados fueron de estudios similares, se hizo una comparación de métodos que se pueden realizar con el software y se llegó al más conveniente. Los artículos y libros que se estudiaron fueron encontrados en páginas de internet.

Cartografía: La información obtenida como son los mapas, fueron hallados en INEGI, estos fueron procesados en QGIS y se obtuvieron los datos necesarios. También se visitó CONABIO y el SIATL.

Plan de estrategia: Se analizó la Ley de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano del Estado de Puebla, para tener una visión con lo que se planteara en la estrategia de planificación de la vulnerabilidad ambiental.

### **3.3 Modelación en QGIS**

En esta etapa se realizó la modelación de la subcuenca hidrográfica Rio Atoyac – Balcón del Diablo en QGIS con los shapefiles descargados de las páginas de INEGI, CONABIO y el SIATL, también se usó el método AHP se Saaty para el mapa de vulnerabilidad, con los siguientes pasos:

- Creación de nuevo proyecto: se creará un nuevo archivo en el software, en el cual inicialmente se agregarán las capas de delimitación de la subcuenca.
- Clasificación de capas descargadas de INEGI y CONABIO: edafología, uso de suelo y vegetación, precipitación, degradación de suelos, municipios e hidrología (este último fue para delimitar la subcuenca).
- Descarga de la elevación digital en QGIS: con un enlace de Earthdata, se creará una cuenta para descargar el modelo de elevación, se creará un mosaico para poder manejar los datos y se recortará de acuerdo con el área de estudio.
- Creación de mapa de Pendientes: con el modelo de elevación recortado, se va al apartado de reclasificación por tabla, y se genera una tabla para clasificar los rangos de la pendiente que se tienen, se convierte a vector y se abre la tabla de atributos, se selecciona un rango y se guarda como una nueva capa, así sucesivamente con todos los rangos, también se agregará la capa de hidrología para identificar el rio principal, finalmente obtenemos el apartado de composición de impresión en el cual se editara el mapa con la escala y simbología correspondiente.

- Creación de mapa de Uso de suelo y Vegetación: con la capa descargada, se recortará de acuerdo con la capa de la subcuenca, en la tabla se atributos se clasificarán todos los tipos de uso de suelo y vegetación que están dentro de la subcuenca, y se exportaran como una nueva capa, también se agregará la capa de hidrología para identificar el rio principal, por último, en la parte de composición de impresión se editara el mapa y se agregara la escala y la simbología.
- Creación de mapa de uso de Edafología: con la capa descargada, se recortará de acuerdo con la capa de la subcuenca, en la tabla se atributos se clasificarán todos los tipos de suelo que están dentro de la subcuenca, y se exportaran como una nueva capa para que estos se identifiquen con un color, también se agregará la capa de hidrología para identificar el rio principal, por último, en la parte de composición de impresión se editara el mapa y se agregara la escala y la simbología.
- Creación de mapa de Precipitación: con la capa descargada, se recortará de acuerdo con la capa de la subcuenca, en la tabla se atributos se clasificarán los datos de precipitación anual que contiene la subcuenca, y se exportaran como una nueva capa para poder identificarlos, también se agregara la capa de hidrología para identificar el rio principal, por último, en la parte de composición de impresión se editara el mapa y se agregara la escala y la simbología.
- Creación de mapa de Degradación de suelos: con la capa descargada, se recortará de acuerdo con la capa de la subcuenca, en la tabla se atributos se clasificarán los datos de degradación de suelos y erosión, y se exportaran como una nueva capa para poder identificarlos, también se agregará la capa de hidrología para identificar el rio principal, por último, en la parte de composición de impresión se editará el mapa y se agregara la escala y la simbología.

- Creación del mapa de vulnerabilidad ambiental: aplicando el método AHP de Saaty, se realizaron tablas en Excel para determinar la matriz de comparación de pares para cada indicador (precipitación, edafología y pendiente) y la matriz de normalización, con los datos obtenidos se pasaron a una tabla para determinar los valores de los factores desencadenantes y condicionantes, con estos datos se encontró el nivel de susceptibilidad y peligro. En el programa de QGIS se agregaron los datos de obtenidos en la tabla de atributos de cada mapa obtenido anteriormente: la matriz de normalización, el factor condicionante y desencadenante, la susceptibilidad y el nivel de peligro.
- Finalmente, con la opción de herramienta de geoprocso en unión se mezclarán los 3 mapas, en la tabla de atributos se agregará un campo para clasificar el rango de peligro desde MA (muy alto) hasta B (bajo), esto dará un área a cada rango de acuerdo con el nivel de susceptibilidad calculado. Se dará color rojo a MA (muy alto), color naranja a A (alto), color amarillo a M (medio) y color verde a B (bajo). Se editará en composición de impresión para obtener el mapa final.

### 3.4 Estimación de los indicadores

De acuerdo con las tablas que se encuentran en el apartado de indicadores, los clasificaremos en factores condicionantes y desencadenantes para determinar la vulnerabilidad ambiental como se muestra en la siguiente tabla 8.

Factores de vulnerabilidad ambiental	
Factores Condicionantes	Factores Desencadenantes
Topografía	Acción antrópica
Geología	Precipitaciones
Hidrología	Deforestación
Geomorfología	

Tabla 8. Clasificación de factores de vulnerabilidad ambiental en condicionantes y desencadenantes

Fuente: Muñoz y Hachi 2022

De acuerdo con la tabla 8 y con los datos cartográficos obtenidos, tenemos como factores condicionantes a la topografía (pendiente) y geomorfología (uso de suelo y vegetación) y como factores desencadenantes a la precipitación y degradación y erosión del suelo.

### **3.5 Propuesta de estrategia de planificación**

- La Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, deberá apoyar para mejorar el uso de suelo y regular los asentamientos humanos.
- Se promocionarán las estrategias para iniciar más estudios desde microcuencas, subcuencas y cuencas para evitar asentamientos en zonas de riesgo, mal uso del suelo, entre otras.
- Propuesta para anteproyectos

## **4. Análisis de los resultados**

### **4.1 Modelación de pendientes**

La subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo tiene un área total de 4106.2 km<sup>2</sup>, la pendiente va de 1142 msnm que es la menor altitud a 3967 msnm que es la mayor altitud, con una

corriente principal de 124.902 km. En la siguiente tabla 9, se muestra la altitud en msnm, la pendiente en grados, el área correspondiente en km<sup>2</sup> y el % de área.

Altitud (msnm)	Pendiente (°)	Área (km <sup>2</sup> )	% de área
1142	< 3°	565.27	13.76
1848	3° - 12°	2131.43	51.90
2555	12° - 25°	1342.42	32.69
3261	25° - 50°	48.68	1.18
3967	> 50°	7.51	0.18

Tabla 9. Clasificación de altitud, pendiente, área y porcentaje.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la clasificación que se muestra en la tabla 9, cabe destacar que el 50% del total del área de la subcuenca corresponde a una pendiente de 3° a 12° con una altitud de 1848 msnm, en la Fig. 4 se muestra la superficie de cada rango de pendiente.

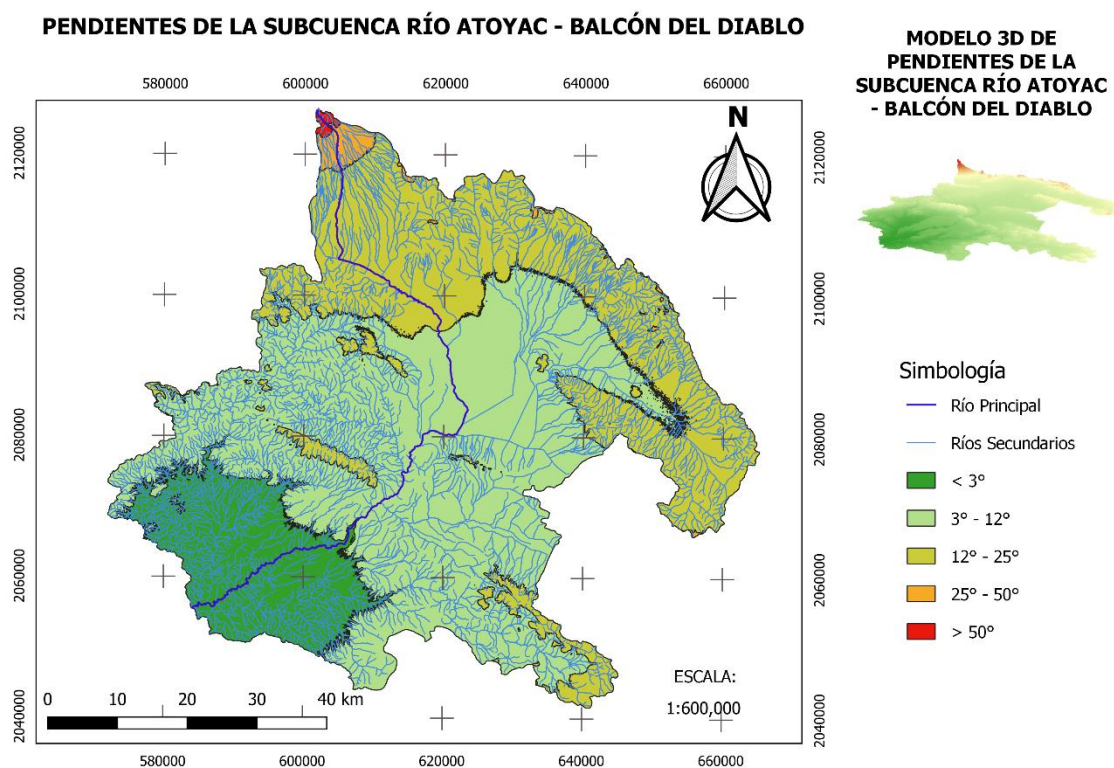


Fig. 4 – Mapa de pendientes de la subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2 Mapa de Uso de suelo y vegetación

El mapa de uso de suelo y vegetación de la subcuenca (Fig. 5), indica que la mayor área es utilizada para agricultura de riego y temporal, debido a que la agricultura de riego utiliza diferentes métodos para sistema de riego va de la mano con el mapa de degradación y erosión del suelo (Fig. 7), es por esto por lo que este es un factor condicionante para la vulnerabilidad ambiental.

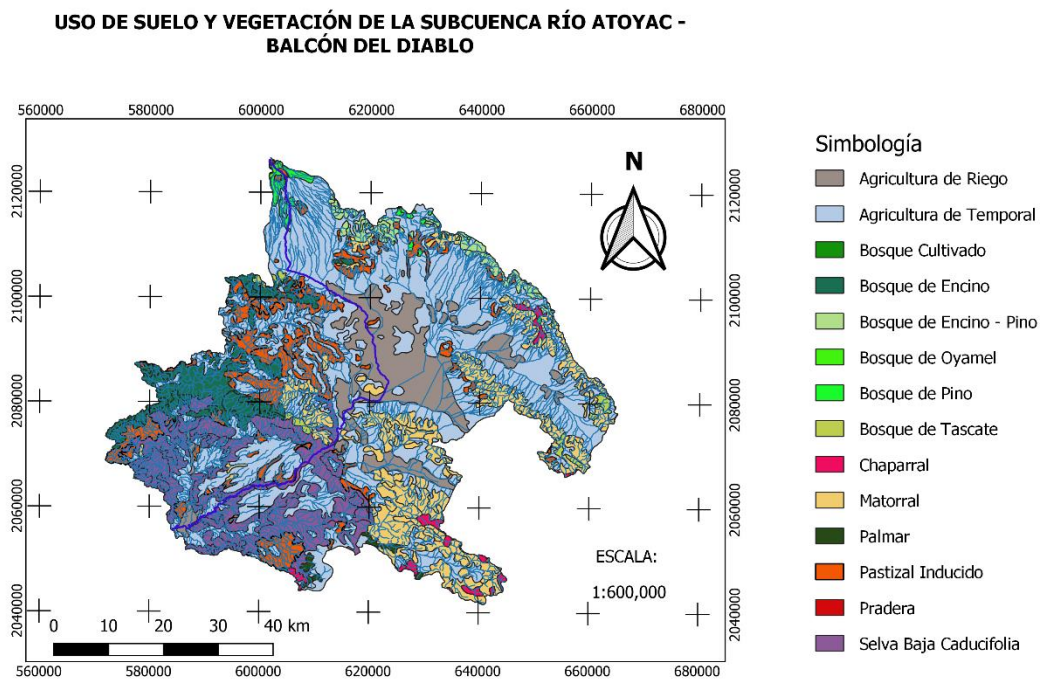


Fig. 5 – Mapa de uso de suelo y vegetación de la subcuenca del Río Atoyac – Balcón del  
Diablo

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 Mapa de Edafología

Los suelos brindan muchos servicios ecosistémicos, como soporte físico e infraestructura para la agricultura, la silvicultura, la recreación de ecosistemas, y servicios socioeconómicos como vivienda, industria y carreteras; de acuerdo a esto es necesario comparar los mapas de edafología y uso de suelo y vegetación, es importante conocer el tipo de suelo y la actividad de uso que se realiza, por ejemplo hay una buena extensión de cambisol cálcico que en ella se realizan actividades de agricultura de riego y temporal, este tipo de suelo es agrícola y dependiente de las lluvias, tiene un buen uso aunque cabe resaltar que por esta actividad se ve reflejado en la degradación química y erosión hídrica. En la fig. podemos observar la edafología que presenta la subcuenca.

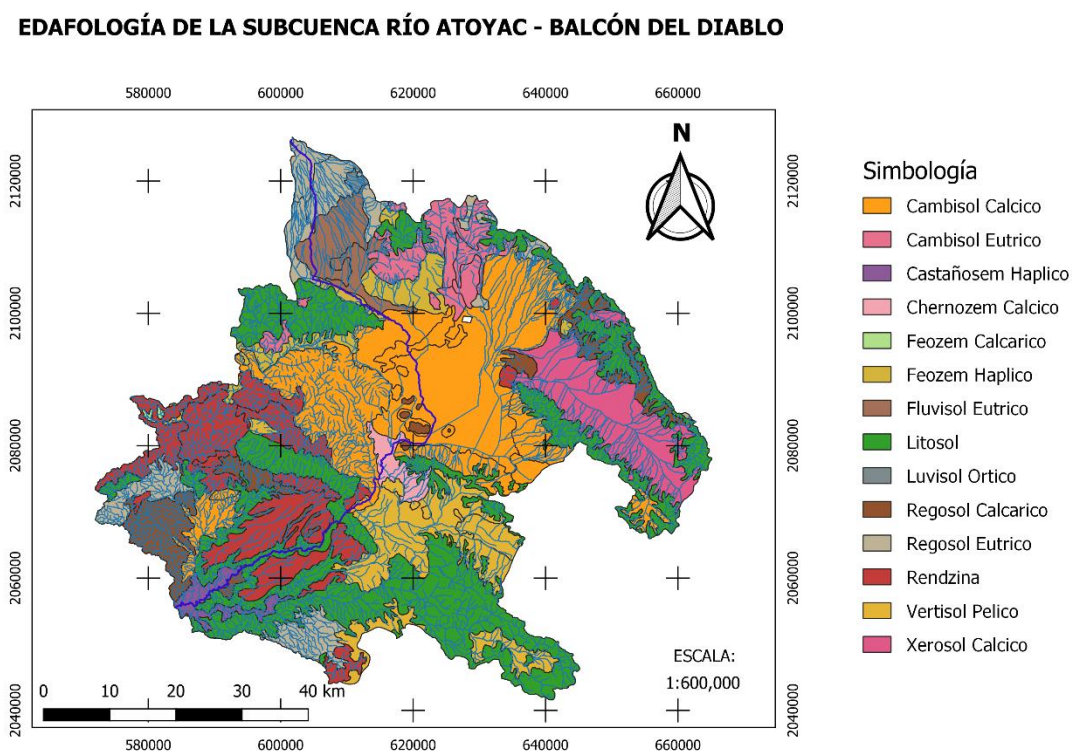


Fig. 6 – Mapa de edafología de la subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Mapa de Degradación y Erosión del suelo

La subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo tiene un área total de 4106.2 km<sup>2</sup>, la degradación y erosión del suelo abarca más del 50% del área total de la subcuenca, clasificada como se muestra en la tabla 10 con su respectiva área y porcentaje.

Tipo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Degradación física	28.53	0.69
Degradación química	928.13	22.6
Erosión hídrica	693.02	16.87
Erosión eólica	741.39	18.05
Sin erosión	1715.13	41.76

Tabla 10. Clasificación de degradación y erosión del suelo, área y porcentaje.

Fuente: Elaboración propia

Al comparar el mapa de degradación y erosión del suelo (Fig. 7) con el de uso de suelo y vegetación (Fig. 5) se nota que el área de erosión hídrica y degradación química es utilizada por agricultura de riego y temporal.

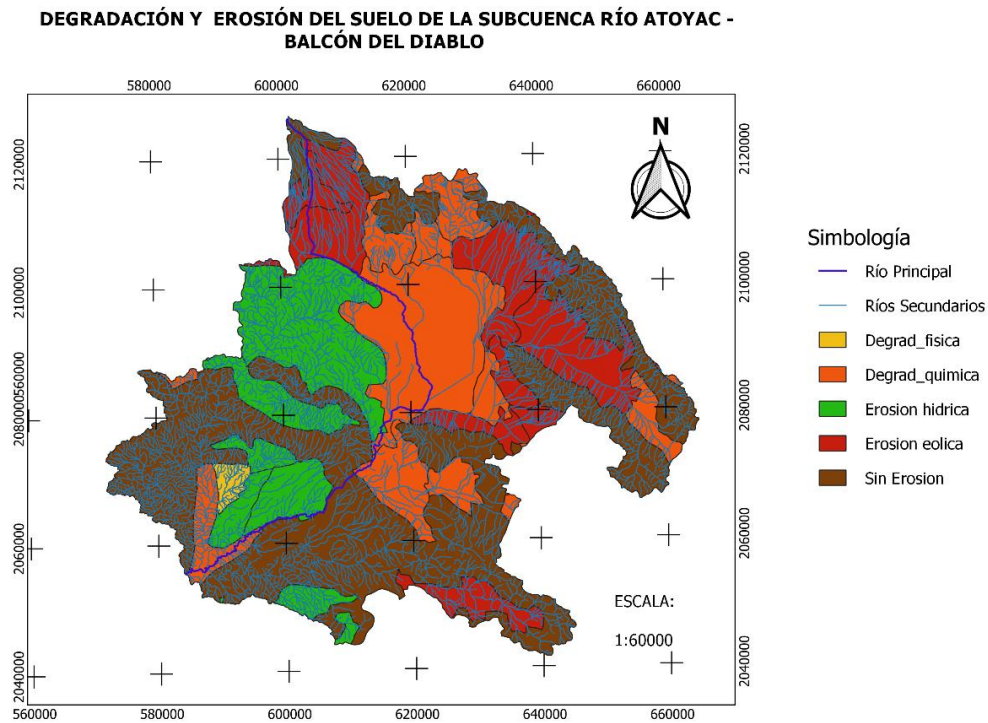


Fig. 7 – Mapa de Degradación y Erosión del suelo de la subcuenca Río Atoyac – Balcón del  
Diablo

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5 Mapa de Precipitación

El agua es considerada un factor importante en la estabilidad de los taludes y algunos de los derrumbes que allí ocurren como son las unidades geomorfológicas que están estrechamente relacionadas con la infiltración y recarga de agua. El mapa de precipitación (Fig. 8) está relacionado con el mapa de pendiente (Fig. 4) debido a lo explicado anteriormente, por lo tanto, donde podría haber una inestabilidad de taludes es en donde existe una mayor pendiente y precipitación.

Precipitación (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
De 400 – 500	174.97	4.26
De 500 – 600	788.55	19.20

De 600 – 800	1710.16	41.64
De 800 – 1000	1073.93	26.15
De 1000 – 1200	358.60	8.73

Tabla 11. Clasificación de rango de precipitación, área y porcentaje.

Fuente: Elaboración propia

**PRECIPITACIÓN DE LA SUBCUENCA RÍO ATOYAC - BALCÓN DEL DIABLO**

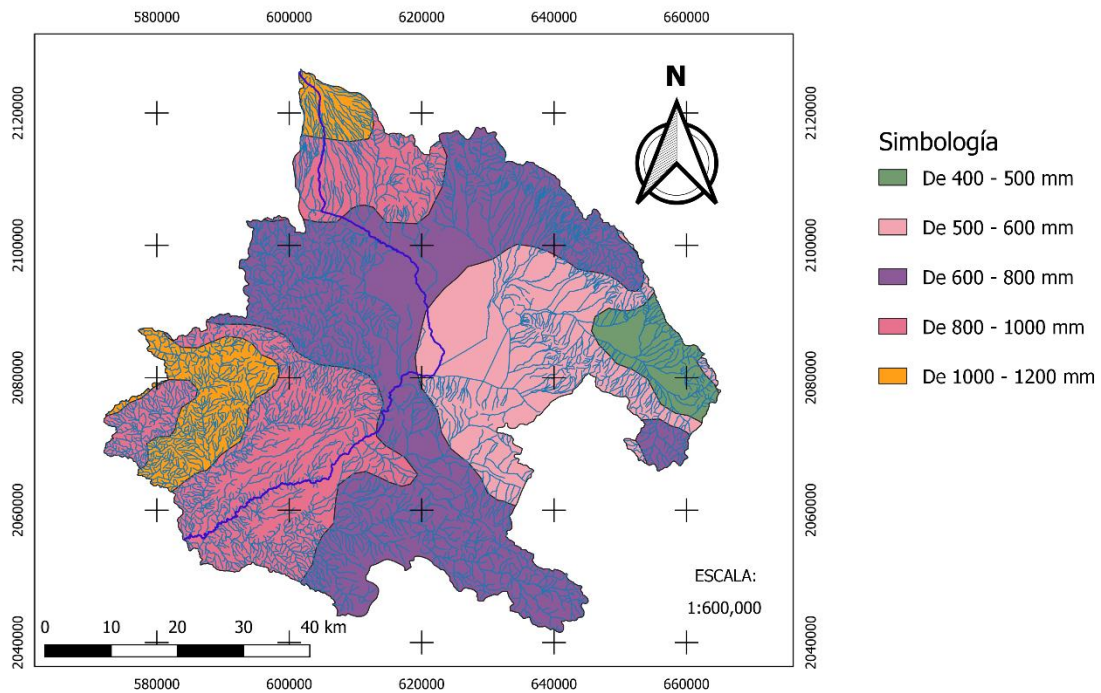


Fig. 8 – Mapa de precipitación de la subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6 Matriz de Saaty y normalización

##### Matriz de comparación entre pares

Se utilizó el método de matriz de comparación entre pares porque da una escala de preferencia y es adecuado para criterio propio presentar el factor que más influye en la vulnerabilidad ambiental; además de que con este método podemos clasificar por áreas donde existe mayor a menor vulnerabilidad con el programa de QGIS.

Para realizar la comparación entre pares se utilizó la tabla 6 y 7, que explica la preferencia entre elementos. A continuación, se presentan los resultados de comparación entre pares de cada factor desencadenante y condicionante que determinan la vulnerabilidad ambiental de la subcuenca (ver tablas de la 12 – 14)

Erosión					
Parámetro	Degradación física	Degradación química	Erosión eólica	Erosión hídrica	Sin erosión
Degradación física	1	3	5	7	9
Degradación química	1/3	1	3	5	7
Erosión eólica	1/5	1/3	1	3	5
Erosión hídrica	1/7	1/5	1/3	1	3
Sin erosión	1/9	1/7	1/5	1/3	1
Suma	1.79	4.68	9.53	16.33	25.00
1/suma	0.56	0.21	0.10	0.06	0.04

Tabla 12. Comparación entre pares del factor Erosión.

Fuente: Elaboración propia

Precipitación					
Parámetro	1000 – 1200 mm	800 – 1000 mm	600 – 800 mm	500 – 600 mm	400 – 500 mm
1000 – 1200 mm	1	2	5	7	9
800 – 1000 mm	1/2	1	3	6	8
600 – 800 mm	1/5	1/3	1	3	6
500 – 600 mm	1/7	1/6	1/3	1	3
400 – 500 mm	1/9	1/8	1/6	1/3	1
Suma	1.95	3.63	9.50	17.33	27
1/suma	0.51	0.28	0.11	0.06	0.04

Tabla 13. Comparación entre pares del factor Precipitación.

Fuente: Elaboración propia

Pendiente					
Parámetro	> 50°	25° - 50°	12° - 25°	3° - 12°	< 3°
> 50°	1	2	4	6	8
25° - 50°	1/2	1	3	5	7
12° - 25°	1/4	1/3	1	3	5
3° - 12°	1/6	1/5	1/3	1	3
< 3°	1/8	1/7	1/5	1/3	1
Suma	2.04	3.68	8.53	15.33	24
1/suma	0.49	0.27	0.12	0.07	0.04

Tabla 14. Comparación entre pares del factor Pendiente.

Fuente: Elaboración propia

Se determino la susceptibilidad a partir de los tres factores influyentes, quedando como se muestra en la tabla 15.

Susceptibilidad			
Parámetro	Erosión	Precipitación	Pendiente
Erosión	1	2	4
Precipitación	1/2	1	2
Pendiente	1/4	1/2	1
Suma	1.75	3.5	7
1/suma	0.57	0.29	0.14

Tabla 15. Comparación entre pares de la susceptibilidad.

Fuente: Elaboración propia

### Matriz de normalización

Se utilizó la matriz de normalización para obtener los resultados de priorización que con estos se clasificara el área de vulnerabilidad dentro de la cuenca.

Esta matriz es la resultante de la matriz entre pares, se le agrega una columna de priorización la cual es el promedio y es el número que nos ayudara a clasificar el rango de peligro en la subcuenca. Esta matriz se aplicó a los tres factores y a la susceptibilidad como se ve en las tablas 16 – 19.

Erosión						
Parámetro	Degradación química	Degradación física	Erosión eólica	Erosión hídrica	Sin erosión	Priorización
Degradación química	0.56	0.64	0.52	0.43	0.36	0.50

Degradación física	0.19	0.21	0.31	0.31	0.28	0.26
Erosión eólica	0.11	0.07	0.10	0.18	0.20	0.13
Erosión hídrica	0.08	0.04	0.03	0.06	0.12	0.07
Sin erosión	0.06	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03

Tabla 16. Matriz de normalización del factor Erosión.

Fuente: Elaboración propia

Precipitación						
Parámetro	1000 – 1200 mm	800 – 1000 mm	600 – 800 mm	500 – 600 mm	400 – 500 mm	Priorización
1000 – 1200 mm	0.51	0.55	0.53	0.40	0.33	0.47
800 – 1000 mm	0.26	0.28	0.32	0.35	0.30	0.30
600 – 800 mm	0.10	0.09	0.11	0.17	0.22	0.14
500 – 600 mm	0.07	0.05	0.04	0.06	0.11	0.07
400 – 500 mm	0.06	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03

Tabla 17. Matriz de normalización del factor Precipitación.

Fuente: Elaboración propia.

Pendiente						
Parámetro	> 50°	25° - 50°	12° - 25°	3° - 12°	< 3°	Priorización
> 50°	0.49	0.54	0.47	0.39	0.33	0.45

25° - 50°	0.28	0.27	0.35	0.33	0.29	0.30
12° - 25°	0.12	0.09	0.12	0.20	0.21	0.15
3° - 12°	0.08	0.05	0.04	0.07	0.13	0.07
< 3°	0.06	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04

Tabla 18. Matriz de normalización del factor Pendiente.

Fuente: Elaboración propia.

Susceptibilidad				
Parámetro	Erosión	Precipitación	Pendiente	Priorización
Erosión	0.57	0.57	0.57	0.57
Precipitación	0.29	0.29	0.29	0.29
Pendiente	0.14	0.14	0.14	0.14

Tabla 19. Matriz de normalización de la susceptibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.7 Factor desencadenante y condicionante

##### Factor desencadenante

Se utilizó el factor desencadenante de acuerdo con la tabla 8, donde se clasifican los elementos que influyen en este factor, se combinaron los factores de erosión y precipitación los cuales son los que desencadenan la vulnerabilidad ambiental.

Para encontrar el factor desencadenante (tabla 20) se multiplicaron los valores obtenidos en la columna de priorización de la matriz de normalización, de los factores de erosión y precipitación; por los valores de priorización de la matriz de normalización de la susceptibilidad.

Parámetro	Erosión		Precipitación		Factor desencadenante
	V_ erosión	valor	V_ precipitación	Valor	V _ desencadenante
1	0.50	0.57	0.47	0.29	0.42
2	0.26	0.57	0.30	0.29	0.24
3	0.13	0.57	0.14	0.29	0.11
4	0.07	0.57	0.07	0.29	0.06
5	0.03	0.57	0.03	0.29	0.03

Tabla 20. Factor desencadenante calculado con el factor erosión y precipitación.

Fuente: Elaboración propia.

### Factor condicionante

Se utilizó el factor condicionante de acuerdo con la tabla 8, donde se muestran los elementos que influyen dentro de este factor, solo se utilizó el parámetro de la pendiente por prioridad entre los otros dos elementos.

El factor condicionante (tabla 21) quedo solo con la matriz de normalización de la pendiente, se tomaron los datos de la columna priorización de la tabla 18.

Parámetro	Pendiente
1	0.45
2	0.30
3	0.15
4	0.07
5	0.04

Tabla 21. Factor condicionante calculado con la matriz de normalización.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.8 Nivel de susceptibilidad y peligro

### Nivel de susceptibilidad

El nivel de susceptibilidad es la probabilidad de estar expuesto significativamente a una condición, es por esto por lo que se establece un parámetro para poder ser medida.

El nivel de susceptibilidad fue calculado con el factor condicionante y desencadenante multiplicado por un descriptor que es este caso es 0.50 porque son dos factores influyentes, obteniendo los valores para susceptibilidad de la tabla 22.

Parámetro	Factor condicionante		Factor desencadenante		Susceptibilidad
	V_ condicionante	Descriptor	V _ desencadenante	Descriptor	V _ susceptibilidad
1	0.45	0.50	0.42	0.50	0.44
2	0.30	0.50	0.24	0.50	0.27
3	0.15	0.50	0.11	0.50	0.13
4	0.07	0.50	0.06	0.50	0.07
5	0.04	0.50	0.03	0.50	0.04

Tabla 22. Nivel de susceptibilidad calculado con el factor condicionante y desencadenante.

Fuente: Elaboración propia.

### Nivel de peligro

El nivel de peligro es lo mismo que el nivel de susceptibilidad, ya que se integraron anteriormente los dos factores que determinan la vulnerabilidad ambiental en la subcuenca.

Para obtener el nivel de peligro se multiplicaron los valores de la tabla 22 de la columna susceptibilidad por el valor de 1 ya que la susceptibilidad es lo mismo que el nivel de peligro permaneciendo con los mismos resultados de la tabla 23.

Susceptibilidad			
Parámetro	V _ susceptibilidad	Descriptor	V _ peligro
1	0.44	1	0.44
2	0.27	1	0.27
3	0.13	1	0.13
4	0.07	1	0.07
5	0.04	1	0.04

Tabla 23. Nivel de peligro.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.9 Rango de peligro

El rango de peligro fue dado de acuerdo con los datos obtenidos previamente en la tabla 23, se clasificaron por medio del valor más alto al bajo.

Para clasificar el rango de peligro se utilizó la abreviación MA para muy alto distinguido por el color rojo, A para alto con el color naranja, M para medio con color amarillo y B para bajo clasificado con color verde.

Rango	Inferior	Superior	
MA	0.27	0.44	
A	0.13	0.27	
M	0.07	0.13	
B	0.04	0.07	

Tabla 24. Rango de peligro con sus respectivos colores.

Fuente: Quispe, A. (2021).

#### 4.10 Análisis de vulnerabilidad

La subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo tiene un área total de 4106.2 km<sup>2</sup>, para obtener el rango de vulnerabilidad ambiental se clasifico desde Muy Alto hasta un rango Bajo. En la siguiente tabla 24, se muestra el rango de vulnerabilidad, el área correspondiente en km<sup>2</sup> y el % de área. El mayor porcentaje de área corresponde a un rango Medio y el menor porcentaje a un rango Bajo.

Rango	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Muy Alto	463.23	11.32
Alto	1528.73	37.37
Medio	1714.93	41.92
Bajo	383.95	9.39

Tabla 24. Rangos de vulnerabilidad con su respectiva área y porcentaje.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo que se muestra en la tabla 24 podemos observar que sumando el rango de muy alto y alto da casi la mitad del área total de la subcuenca, también es importante destacar que el rango bajo corresponde al menor porcentaje de área. Por lo tanto, si es considerable la vulnerabilidad ambiental en la subcuenca, pero solo en el área de rango muy alto debido a las condiciones por las cuales se clasifico, además el factor de degradación y erosión suelo es el que se le puede dar más enfoque porque es causado por la actividad humana. En la Fig. 9 se muestra la distribución de los rangos de vulnerabilidad en la subcuenca y el área correspondiente.

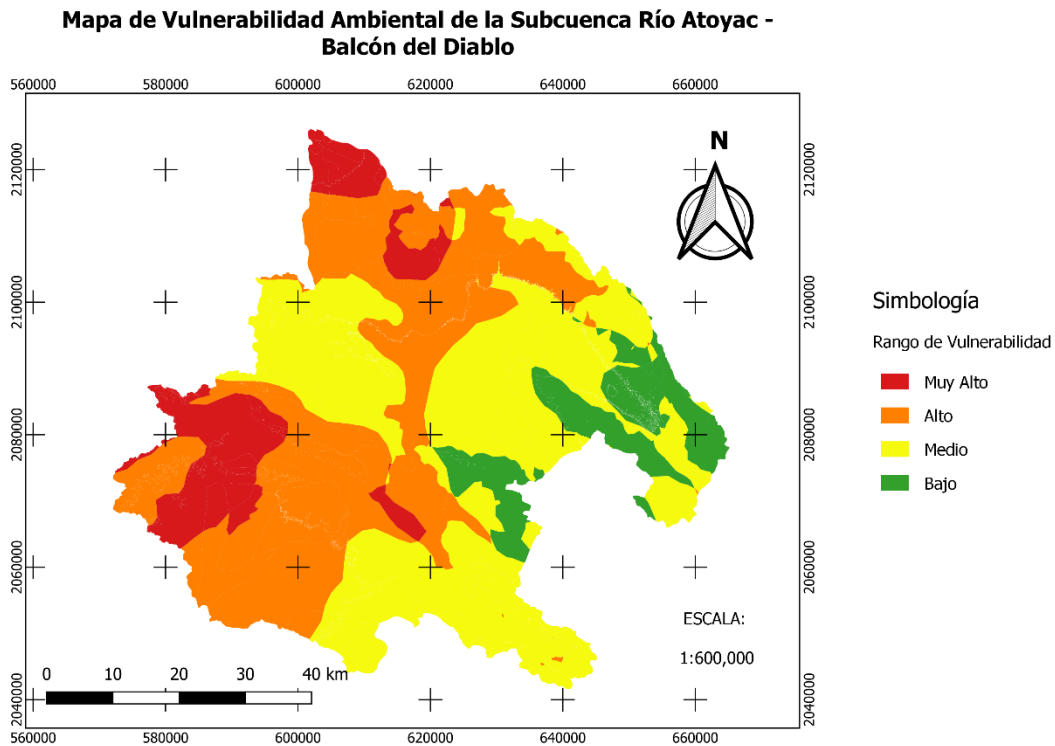


Fig. 9 – Mapa de vulnerabilidad ambiental en la subcuenca Río Atoyac – Balcón del Diablo  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.11 Estrategia de planificación

La Secretaría de Medio Ambiente deberá apoyar para mejorar el uso de suelo: se propone agregar a la página informativa de la Secretaría de Medio Ambiente un apartado más específico para cuencas y subcuencas, donde se muestre la vulnerabilidad ambiental o hídrica con propuesta de alternativas para mejor uso de estas en zonas de mayor riesgo.

La ley Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial deberá regular los asentamientos humanos: este deberá estar ligado a la página informativa para regular los asentamientos humanos en riesgo, además de regular la actividad humana para prevenir el deterioro del suelo el cual está ligado a la actividad forestal y agrícola.

Se promocionarán las estrategias para iniciar más estudios desde microcuencas, subcuencas y cuencas para evitar asentamientos en zonas de riesgo, mal uso del suelo, entre otras.

Propuesta para anteproyectos: será indispensable consultar la página informativa para ubicar geográficamente donde se realizará el proyecto, de acuerdo con las necesidades se dará pauta a si es viable o no.

## **5. Conclusión**

Este estudio demuestra que los factores analizados influyen ambientalmente en la Subcuenca del Río Atoyac – Balcón Del Diablo, por esto se puede determinar la vulnerabilidad que se encuentra en la actualidad. De acuerdo con los datos obtenidos la subcuenca tiene una vulnerabilidad del 48.69 % que incluye un rango alto a muy alto como se muestra en los resultados y esta presentado gráficamente en la Fig. 9.

Los objetivos se lograron ejecutar ya que mediante los indicadores de referencia se realizó el mapa de vulnerabilidad, además de usar en conjunto las herramientas de un sistema de información geográfica (QGIS). Los indicadores de mayor importancia fueron la precipitación y la degradación y erosión del suelo debido a que fueron clasificados como factores desencadenantes y estos desatan la vulnerabilidad ambiental en las zonas que más ocurrencia tienen estos factores provocando el deterioro del suelo.

Es fundamental supervisar con más precisión y agregando otros factores de la vulnerabilidad dentro de la subcuenca, además de que se puede agregar una vulnerabilidad total e hídrica para obtener resultados precisos, poder optar por mejores medidas informativas y de seguridad, para el medio ambiente y así contrarrestar al cambio climático, devastación del agua y deterioro del suelo.

## 6. Referencias Bibliográficas

- Análisis espacial. Evaluación multicriterio (AHP). Recuperado de: [https://eva.fcien.edular.edu.uy/pluginfile.php/81718/mod\\_resource/content/6/EMC\\_Saaty\\_2020.pdf](https://eva.fcien.edular.edu.uy/pluginfile.php/81718/mod_resource/content/6/EMC_Saaty_2020.pdf)
- Biblioteca de Publicaciones Oficiales del Gobierno de la República. (n.d.). Recuperado de <https://www.gob.mx/publicaciones/es/articulos/atlas-de-vulnerabilidad-hidrica-en-mexico-ante-el-cambio-climatico?idiom=es>
- Conabio. (2023). Degradación de suelos [Archivo shp]. Recuperado de: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root%2Fedaf0%2Fdsuelo%2Fdegra250kgw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root%2Fedaf0%2Fdsuelo%2Fdegra250kgw)
- Conabio. (2023). Precipitación [Archivo shp]. Recuperado de: [www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/clima/precip/isoyt1mgw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/precip/isoyt1mgw)
- Cloter, H. (2010). Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización. Mexico: Pluralia. Recuperado de: <https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-de-mexico-diagnostico-y-priorizacion/>
- Environmental Systems Research Institute (N.d.). Recuperado de: <https://www.esri.com/es-es/what-is-gis/overview>
- Gaspari, F. J., Rodriguez Vagaría, A., Delgado, M., Senisterra, G., & Denegri, G. (2011). VULNERABILIDAD AMBIENTAL EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS SERRANAS MEDIANTE SIG. *Multequina*, (20),3-13. ISSN: 0327-9375. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42824203001>
- Garcés Ortega, Jhonny Humberto (2015). Aplicación de evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para el modelado de la capacidad de acogida para

la localización de viviendas de mediana densidad: caso de estudio cuenca del río Guadalajara (Valle del Cauca). Disponible en: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7754/1/CB-0491731.pdf>

- Hurtado, T. & Bruno, G. (n.d.). El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Recuperado de: [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano\\_hg/cap3.PDF](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap3.PDF)
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2020). Morfología de las cuencas hidrológicas. UPV. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/10782>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Edafología [Archivo zip]. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). RH18ab [Archivo zip]. Recuperado de: <https://inegi.org.mx/temas/hidrografia/#descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Uso de suelo y vegetación [Archivo zip]. Recuperado de: <https://inegi.org.mx/temas/usodesuelo/#descargas>
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (n.d.). Recuperado de: <https://www.gob.mx/inafed/articulos/el-20-de-los-municipios-son-vulnerables-al-cambio-climatico-que-acciones-de-mitigacion-y-adaptacion-implementa-municipio#:~:text=M%C3%A9xico%20es%20un%20pa%C3%ADs%20vulnerable%20a%20los%20efectos,socioambientales%2C%20econ%C3%B3micas%20y%20de%20salud%2C%20intensifican%20los%20problemas.>

- López Báez, W., (2014). ANÁLISIS DEL MANEJO DE CUENCAS COMO HERRAMIENTA PARA EL APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE RECURSOS NATURALES. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, XIII (2),39-45. ISSN:. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455545055001>
- Quispe, A. (2021). CLASE 01 - Mapa de peligro, vulnerabilidad y riesgo utilizando QGIS (matriz Saaty) [Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=X9DikUwpy6U&t=4s>
- Salazar, R. M., & Pazmiño, M. X. H. (2022). Factores de vulnerabilidad ambiental, Desarrollo Social y Económico, Cerro Susanga, Canton Chimbo: Semantic scholar. Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/FACTORES-DE-VULNERABILIDAD-AMBIENTAL%2C-DESARROLLO-Y-Salazar-Pazmi%3%B1o/e811f072e98f4550afa742600938980a827ba6f5>
- Sánchez, A. S., García, R. M., Palma A. (2003). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. México: SEMARNAT. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/280938710\\_Cuencas\\_hidrograficas\\_Fundamentos\\_y\\_perspectivas\\_para\\_su\\_manejo\\_y\\_gestion](https://www.researchgate.net/publication/280938710_Cuencas_hidrograficas_Fundamentos_y_perspectivas_para_su_manejo_y_gestion)
- SIATL. Información de rasgos. Recuperado de: [https://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/](https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/)
- Social, I. N. de D. (n.d.). Recuperado de: <https://www.gob.mx/indesol/prensa/degradados-64-de-los-suelos-en-mexico>
- Sitio de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (n.d.). Recuperado de: <https://www.gob.mx/inecc>

- Vélez, A. S., María, G. N. R., & Trujano, A. P. (2003). La Cuenca Hidrográfica: Unidad Básica de Planeación y Manejo de Recursos Naturales. México: SEMARNAT, Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable.